

## مروری بر روند تحلیل و طراحی سیستم‌های کنترل: وضعیت کنونی و آینده

علی خاکی صدیق

**چکیده:** تحلیل و طراحی سیستم‌های کنترل از دیرباز مورد توجه پژوهشگران و مهندسان بوده است. با توسعه علم، تکامل فناوریها و پیچیده‌تر شدن صنایع نقش کلیدی تحلیل و طراحی سیستم‌های کنترل در طول زمان پر رنگ‌تر شده است. امروزه، سیستم‌های کنترل نقش انکارناپذیری در فراهم آوردن راحتی و آسایش عمومی، سلامت، امنیت و محافظت از محیط‌زیست دارند. در این مقاله به اجمال روشهای تحلیل و طراحی سیستم‌های کنترل و کاربردهای آنها در دهه اول قرن بیست و یکم و روند آینده آن ارائه و تلاش شده است تا اثرگذارترین دستاورد مهندسان و پژوهشگران سیستم‌های کنترل در قرن گذشته معرفی و وضعیت کنونی کاربرد و پژوهش مهندسی کنترل به تصویر کشیده شود. سرانجام، کاربردهای آینده و زمینه‌های پژوهشی در آینده بررسی شده است.

واژه‌های کلیدی: تحلیل و طراحی سیستم‌های کنترل، حال، آینده.

۱. استاد گروه کنترل، قطب کنترل صنعتی، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران.  
sedigh@kntu.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۳۹۳/۲/۱۳)

(پذیرش مقاله: ۱۳۹۳/۲/۱۴)

## ۱. مقدمه

مطالعات مروری روشهای تحلیل و طراحی مهندسی می‌تواند در بازبینی سیاستگذاریهای علمی و آینده‌پژوهی آن کمک شایانی بکند. مباحثی از قبیل مطالعات در روند توسعه و تکامل علوم، بررسی وضعیت کنونی، مهم‌ترین چالشهای پیش رو و مسائل حل نشده همگی به پژوهشگران و فناوران عرصه‌های علمی در راهیابی و جهتگیریهای آینده کمک می‌کنند. از سوی دیگر، آینده‌نگاری علوم می‌تواند به جهتگیری پژوهش و استفاده کارآمد از منابع کمک کند و از این رو، مورد توجه بسیاری از پژوهشگران و سیاستگذاران حوزه علم و فناوری بوده است. در این مقاله ضمن بررسی کوتاه و کلان‌نگرانه وضعیت کنونی مهندسی کنترل از دیدگاه تحلیل و طراحی سیستم‌های کنترلی و کاربردهای آن، به آینده و مسیر حرکت مهندسی سیستم‌های کنترل پرداخته شده است. این بررسی از دو منظر مباحث نظری و زمینه‌های کاربردهای سیستم‌های کنترل ارائه شده است. مطالعات مروری و آینده‌پژوهی در مهندسی کنترل را می‌توان در گامهای زیر خلاصه کرد:

گام اول: مروری بر دوره‌های تکامل روشهای مهندسی کنترل:

- دوره قبل از انقلاب صنعتی
- دوره انقلاب صنعتی
- نیمه اول قرن بیستم
- نیمه دوم قرن بیستم

گام دوم: مهندسی کنترل: دهه اول قرن بیست و یکم تاکنون

گام سوم: مهندسی کنترل: جهتگیریهای آینده

در این مقاله سیر تکاملی یا به عبارت دیگر، تاریخ مهندسی کنترل ارائه نمی‌شود. خواننده علاقه‌مند می‌تواند به مراجع مربوط مراجعه کند. در این مقاله عناوین و مسائل کلی مهندسی کنترل در دهه اول قرن بیست و یکم تاکنون مطرح شده است. سپس، شمایی کلی از وضعیت آینده تحلیل و طراحی سیستم‌های کنترل ارائه و عناوین زمینه‌های مطرح بیان شده است.

روشهای تحلیل و طراحی سیستم‌های کنترلی از وادی هنر به یک علم تمام عیار در اواخر قرن نوزدهم تبدیل شدند. آغاز کاربردهای گسترده سیستم‌های کنترل و ابزار دقیق در اوایل قرن بیستم با دو چالش کلیدی روبه‌رو بود که عبارت بودند از: طرح درست مسئله تحلیل و طراحی سیستم‌های کنترل بر مبنای یک نظریه واحد و بیان دقیق و ریاضی آن و همچنین، ارائه روشهای تحلیل و طراحی

- 
1. Review Studies
  2. Futuristic Studies
  3. Instrumentation

ساده و سر راست برای حل مسائل صنعتی و کاربردی. مهندسان کنترل به خوبی از عهده حل هر دو چالش برآمدند و در دهه‌های آغازین قرن بیستم به دستاوردهای بزرگی دست پیدا کردند که مهم‌ترین آنها عبارت‌اند از:

- تبیین ایده کاربردیِ فیدبک منفی در سیستم‌های کنترل؛
- مدلسازی سیستم‌های کنترلی با توصیف معادلات دیفرانسیل، تابع تبدیل و دیاگرام‌های بلوکی؛
- تحلیل سیستم‌های فیدبک حلقه بسته با داشتن مدل حلقه باز؛
- ارائه روشهای جبران‌سازی بر اساس پاسخ فرکانسی و حوزه؛
- ارائه حاشیه پایداری، حساسیت و مقاومت در برابر نامعینی و تغییر پارامترها؛
- تدوین مبانی فیلترینگ و پیش‌بینی به‌وسیله وینر .

دهه‌های میانی قرن بیستم، به دنبال بروز ضعفهای جدی در روشهای کنترلی در خصوص حل مسائل دشوار پیش‌رو و پیچیده‌تر شدن سیستم‌ها و به تبع آن نیازهای جدید کنترلی، شاهد ارائه روشهای مدرن تحلیل و طراحی سیستم‌های کنترل بر اساس ایده‌های فضای حالت کالمن بود. این ایده‌ها ظهوری پر قدرت، ادعاهایی فراوان، تحقیقات بسیار و گسترده داشتند، اما کاربردهای طراحی آنها چندان پر استقبال نبود و بسیاری از واحدهای صنعتی از به‌کارگیری آنها خودداری کردند. این روشها با دو مشکل اساسی شفافیت و مقاومت روبه‌رو بودند. جهتگیریهای بعدی در نیمه دوم قرن بیستم را می‌توان در جهت حل این مسائل و ارائه روشهای کاربردی و عملی تحلیل و طراحی سیستم‌های کنترل پیشرفته دانست. مهم‌ترین محورهای مباحث کنترل پیشرفته و دستاوردهای آن در نیمه دوم قرن بیستم عبارت‌اند از:

- تلاش فراوان در تعمیم ایده‌های کنترل پاسخ فرکانسی برای در نظر گرفتن نامعینی و کنترل مقاوم؛
- سیستم‌های زمان گسسته ؛
- سیستم‌های خودتنظیم یا تطبیقی و مبانی مرتبط با آن؛

- 
1. Sensitivity and Robustness
  2. Uncertainty
  3. Filtering and Prediction
  4. Wiener
  5. Transparency and Robustness
  6. Discrete Time Systems
  7. Self-tuning or Adaptation

۳۴ مروری بر روند تحلیل و طراحی سیستم‌های کنترل: وضعیت کنونی و آینده

- تلفیق دو ایده طراحیهای کلاسیک و مدرن با وارد کردن روشهای کلاسیک حوزه فرکانس در طراحیهای مدرن و مقاوم؛
  - سیستم‌های هوشمند با محاسبات نرم؛
  - در نظر گرفتن سیستم‌های غیرخطی و چندمتغیره در بسیاری از تعمیم‌ها.
- در بخش بعد، به اجمال رویکردهای مهندسی کنترل در دهه اول قرن بیست و یکم بررسی شده است.

## ۲. مهندسی کنترل: دهه اول قرن بیست و یکم

بسیاری از فعالیتهای سالهای آغازین این قرن در ادامه مطالعات دهه‌های آخر قرن بیستم است. این فعالیتها را می‌توان در دو بخش نظری و کاربردی جمع‌بندی کرد که به ترتیب در ادامه آورده شده است.

### ۲.۱. گزیده‌ای از فعالیتهای نظری در حوزه مهندسی کنترل

در این بخش رئوس مهم‌ترین فعالیتهای در حوزه نظری تحلیل و طراحی سیستم‌های کنترل ارائه شده است. در ارائه این فعالیتهای فقط سرفصلهای آنها آورده شده و ترتیب خاصی نیز در ارائه آنها مد نظر نبوده است.

تعریف، مدل‌سازی و کنترل سیستم‌های پیچیده. یکی از موضوعات مورد توجه در پانزده سال گذشته تلاش برای ارائه تعریفی جامع و دقیق برای پیچیدگی در سیستم‌هاست. با توجه به این تعریف مباحث مدل‌سازی و کنترل آنها نیز به شدت مورد توجه بوده‌اند.

کنترل تطبیقی. مباحث مربوط به کنترل تطبیقی به دلیل اهمیت فراوان کاربردی آن، در شش دهه گذشته مورد توجه جدی بوده است. در اواخر قرن گذشته مباحث مربوط به سیستم‌های تطبیقی پایدار و مقاوم در برابر نامعینی‌ها و اغتشاشات نامعلوم برای سیستم‌های خطی به خوبی پرورانه شدند. در سالهای اخیر عمده توجه به سمت کنترل تطبیقی سیستم‌های غیرخطی، تحلیلهای جامع‌تر

- 
1. Intelligent Systems
  2. Soft Computing
  3. Nonlinear and Multivariable
  4. Complex Systems

مقاومت، کنترل تطبیقی مقاوم از دیدگاه مدل‌های چندگانه، سیستم‌های کلیدزنی و رؤیتگرهای تطبیقی مقاوم است.

کنترل مقاوم. کنترل مقاوم به دلیل ارائه جبران‌سازی ساده و قابل پیاده‌سازی و همچنین، ارتباط تنگاتنگ آن با مفاهیم کنترل کلاسیک هم اکنون نیز از روش‌های مورد علاقه پژوهشگران است. مباحث اصلی مطرح شده به روش‌های طراحی، مسائل بهینه‌سازی و کاربرد انواع ناتساویهای ماتریسی بر می‌گردد.

کنترل پیش بین. کنترل پیش‌بین از پرکاربردترین روش‌های کنترل پیشرفته است که حجم گسترده‌ای از تحقیقات در چهار دهه گذشته به آن اختصاص دارد. در سال‌های اخیر موضوعات مطرح شده آن فراوان هستند و می‌توان از آن میان به کاربرد در سیستم‌های گسترده، کنترل نامتمرکز، مقاومت روش‌ها، مسائل بهینه‌سازی و سریع کردن بخش بهینه‌ساز و کاربرد در سیستم‌های غیرخطی اشاره کرد.

سیستم‌های غیرخطی. تحلیل پایداری و پایدارسازی، شناسایی سیستم و طراحی رؤیتگر، مسئله تأخیر، کنترل مقاوم و بهینه و مسائل مختلف در باره سیستم‌های غیرخطی آشوبناک از مهم‌ترین مباحث مطرح شده در سال‌های اخیر در حوزه سیستم‌های غیرخطی است.

سیستم‌های هایبرید. بسیاری از سیستم‌های پیشرفته در اتوماسیون و کنترل هایبرید هستند و از این‌رو، به مدلسازی، تحلیل پایداری، عملکرد و مقاومت، رؤیت پذیری و طراحی رؤیتگر و محاسبات سیستم‌های هایبرید توجه فراوانی شده و هم اکنون از حوزه‌های فعال پژوهشی است.

پایدارسازی و کنترل سیستم‌های مقید. وجود قیدهای حالت و ورودی که همه سیستم‌های واقعی با آن روبه‌رو هستند، به تنزل عملکرد و در مواردی ناپایداری حلقه بسته منجر می‌شود. لذا، بررسی

- 
1. Multiple Model
  2. Switching Systems
  3. Robust Adaptive Observers
  4. Matrix Inequalities
  5. Predictive Control
  6. Decentralized
  7. Delay
  8. Chaotic
  9. Hybrid Systems
  10. Constrained

۳۶ مروری بر روند تحلیل و طراحی سیستم‌های کنترل: وضعیت کنونی و آینده

این سیستم‌ها از حدود دو دهه قبل به‌طور جدی آغاز و تاکنون نیز در حوزه سیستم‌های خطی و اخیراً در سیستم‌های غیرخطی مقید ادامه دارد.

عیب‌یابی و پایش عملکرد، دو موضوع مهم و کاربردی در مهندسی کنترل عیب‌یابی و پایش عملکرد هستند که هم‌اکنون نیز از موضوعات مهم پژوهشی به‌شمار می‌آیند. عیب‌یابی در سیستم‌های خطی به اواسط قرن بیستم بر می‌گردد، اما پایش عملکرد در دهه‌های آخر آن مطرح و بررسی شده است. کنترل بر مبنای محاسبات نرم، کنترل هوشمند از گسترده‌ترین زمینه‌های پژوهشی و کاربردی مهندسی کنترل است و هم‌اکنون نیز مورد توجه فراوان است. مدلسازی و کنترل با استفاده از منطق فازی، شبکه‌های عصبی، سیستم‌های خبره، هوش مصنوعی، بهینه‌سازیهای تکاملی و تصادفی و زمینه‌های ترکیبی یا وابسته به آنها همگی از این دسته‌اند.

سیستم‌های بی‌نهایت بعدی، مدلسازی، پایدارسازی و کنترل سیستم‌های چندبعدی و بی‌نهایت بعدی نیز از موضوعاتی است که در سالهای اخیر به‌طور محدود مورد توجه بوده است. حسابان کسری و کنترل کسری، اگرچه حسابان کسری قدمتی چند صد ساله دارد، اما کاربرد آن در مدلسازی و کنترل سیستم‌ها موضوعی جدید است که به‌طور جدی در دهه گذشته به آن توجه شده است. کنترل کسری از زمینه‌های رو به رشد در حوزه پژوهش است و چنانچه کاربردهای بیشتری در سالهای آینده پیدا کند، اقبال به آن گسترده‌تر خواهد شد.

۲.۲. گزیده‌ای از کاربردها در حوزه مهندسی کنترل

مهندسی کنترل در تمام بخشهای زندگی مدرن وارد شده است و ارائه فهرستی از کاربردهای آن اگر ناممکن نباشد، بسیار دشوار است. در این بخش رئوس مهم‌ترین کاربردهای کلان مهندسی سیستم‌های کنترل در قرن بیست و یکم ارائه شده است. در ارائه این فعالیتها ترتیب خاصی رعایت نشده و نگرش کلان در ارائه کاربردها مد نظر بوده است.

- 
1. Fault Detection and Performance Monitoring
  2. Fuzzy Logic
  3. Neural Networks
  4. Expert Systems
  5. Artificial Intelligence
  6. Evolutionary and Random Optimization
  7. Infinite Dimensional
  8. Fractional Calculus and Fractional Control

سیستم‌های کنترل فرایندهای صنعتی. کنترل فرایندهای شیمیایی، انواع نیروگاهها و مجتمع‌های پتروشیمی با صدها حلقه کنترل و هزاران سیگنال با بالاترین استانداردهای کیفیت محصول و عملکرد به‌ویژه در سیستم‌هایی که از نظر ایمنی مخاطره‌آمیز هستند، در توسعه پایدار جوامع نقشی کلیدی دارند. بسیاری از این حلقه‌ها هم‌اکنون تحت کنترل انواع راهکارهای پیشرفته کنترلی هستند و شرکت‌های بزرگ و کوچک در این زمینه خدمات گسترده‌ای ارائه می‌کنند.

سیستم‌های کنترل، هدایت و ناوبری اجسام پرنده. ناوبری، هدایت و کنترل (خودخلبان یا اتوپیلوت) اجزای اصلی سیستم حلقه بسته کنترل را تشکیل می‌دهند. یکی از کاربردهای موفق مهندسی کنترل در تضمین پایداری، جهت‌دهی و ردیابی دقیق سیگنال‌های مرجع اجسام پرنده است. کنترل اجسام پرنده اعم از انواع هواپیماها، موشک‌ها و ماهواره‌ها با وجود غیرخطی‌گری شدید، نامعینی‌ها و تغییرات محیطی گسترده، دشوار و از دیرباز (جنگ جهانی دوم) مورد توجه بوده است. سیستم‌های ناوبری، هدایت و کنترل این وسایل به خوبی شناخته شده و هم‌اکنون مورد استفاده گسترده است.

صنایع فرآوری و تولیدی<sup>۱</sup>. سیستم‌های کنترل در صنایعی از قبیل خودروسازی، غذایی، کاغذ و چوب، مدارهای مجتمع و ... در مراحل مختلف نقش ویژه‌ای در جابه‌جایی قطعات و ترکیب یا سرهم کردن دقیق قطعات و ابزار دارند. کاربرد وسیع سیستم‌های کنترل به‌منظور حداکثر بهره‌وری، بهینه‌سازی و تضمین کیفیت محصولات ضروری است. این سیستم‌ها با توجه به تجارت آزاد جهانی و رقابت تنگاتنگ واحدهای تولیدی بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته‌اند.

کنترل سیستم‌های مخابراتی. کنترل شبکه‌های مخابراتی، موبایل و اینترنت برای سرویس‌دهی مطمئن و با کیفیت مطلوب از کاربردهای مهم کنونی مهندسی کنترل است. تنظیم سطح توان سیگنال، تأخیر و از دست دادن اطلاعات، امنیت شبکه، حذف تطبیقی نویز برای پاسخ دادن به مشخصه‌های متغیر با زمان خط انتقال از ویژگی‌ها و دشواری‌های این طراحی‌هاست. از این شبکه‌ها به‌عنوان یکی از بزرگ‌ترین سیستم‌های ساخته‌شده انسان یاد می‌شود که ابعاد بسیار وسیع آنها کنترل آنها را به چالشی جدی تبدیل کرده است.

مهندسی پزشکی. سیستم‌های پزشکی همواره مورد توجه مهندسان کنترل برای کاستن خطای انسانی و بالا بردن دقت کار بوده‌اند. کنترل فشار خون، کنترل تزریق انسولین، کنترل در بیهوشی، کمک به بیماران با اختلالات حرکتی، مدلسازی و کنترل بیماری‌های خاص از قبیل سرطان و کاربردهای متنوع

رباتیک در مهندسی پزشکی از موضوعات مطرح در این حوزه است. در برخی از این کاربردها محصولات تجاری نیز موجود است و در پاره‌ای دیگر نتایج در حد دستاوردهای پژوهشی است. کاربردهای مدلسازی، شبیه‌سازی، پایش، پیش‌بینی و تحلیل سیستم. کاربردهای مهندسی کنترل در سیستم‌هایی که لزوماً فیزیکی یا ساخته انسان نیستند، در دو دهه اخیر مورد توجه جدی‌تر قرار گرفته‌اند. در این میان می‌توان به سیستم‌های اقتصادی و مهندسی مالی از قبیل پیش‌بینی قیمت سهام یا نرخ تورم و ... کاربردهای مدیریتی و مدیریت بحران از قبیل پیش‌بینی زلزله یا سیل و مسائل زیست محیطی اشاره کرد. این سیستم‌های پیچیده اگر چه در حوزه‌های مختلفی هستند، اما ابزارهای مشترکی برای مدلسازی، شبیه‌سازی، پایش، پیش‌بینی و تحلیل آنها با سریهای زمانی یا مدل‌های شناسایی و معادلات ریاضی در مهندسی کنترل توسعه داده شده است. کاربردهای گسترده در سیستم‌های حمل و نقل. یکی از کاربردهای موفق سیستم‌های کنترل در حوزه حمل و نقل است. این حوزه در دهه‌های اخیر پیشرفتهای فراوانی داشته است. از سیستم‌های کنترلی در خودروهای مدرن تا سایر وسایل حمل و نقل و آزادراه‌های هوشمند همگی از زمینه‌های کاربردی مهندسی کنترل است. پایدارسازی و کنترل قطارهای سریع نیز از زمینه‌هایی است که در سه دهه اخیر دستاوردهای چشمگیری داشته است.

### ۳. مهندسی کنترل: جهت‌گیریهای آینده

عوامل متعددی در شکل‌دهی جریانهای آینده علم و فناوری مؤثرند. شناسایی این عوامل برای مطالعه زمینه‌ای خاص در حوزه علم و فناوری مهم هستند. در بررسی روند آینده مهندسی کنترل و مطالعات آینده‌پژوهی مربوط به آن، باید به چند واقعیت کلیدی اشاره کرد که در بررسی رویکردهای آینده مهم هستند. این واقعیتها را می‌توان در محورهای زیر خلاصه کرد:

- دسترسی به تواناییهای محاسباتی و ارتباطی تقریباً نامحدود است؛
- فناوریهای پیشرفته حسگری درجه‌هایی به سوی کاربردهای جدید گشوده است. با این حسگرها می‌توان متغیرهایی را اندازه‌گیری و فیدبک کرد که قبلاً امکان‌پذیر نبوده است؛
- روند طراحی بسیاری از سیستم‌های آینده با پیچیدگی بسیار زیاد، تداخلهای غیرخطی و متغیر با زمان و توزیع شده همراه است. اینهمه، سیستم‌های آینده را از نظر دینامیکی بسیار پیچیده‌تر می‌کنند؛



- از ملزومات طراحی سیستم‌های کنترل آینده می‌توان به پایداری و عملکرد بالا با قابلیت اطمینان و ایمنی مناسب و ساختارهای شکل‌دهی مجدد<sup>۱</sup> در حضور انواع نامعینی و اغتشاشات نامعلوم یا خرابیها و پیش‌عیب‌یابیهای پیشرفته نام برد.

در این مقاله به منظور بررسی جهتگیری آینده مهندسی کنترل، با در نظر داشتن موارد یاد شده، نخست برخی از کاربردهای دهه‌های آینده این سیستم‌ها شمرده شده است. کاربردها بیانگر نیازهای کنترلی آینده هستند و از دریچه آنها می‌توان تا حدودی به نظریه‌های تحلیل و طراحی سیستم‌های کنترلی پی برد. سپس، به برخی زمینه‌های نظری آینده اشاره شده است.

### ۳.۱. گزینه‌ای از کاربردهای آینده مهندسی کنترل

در این بخش گزینه‌ای از کاربردهای آینده سیستم‌های کنترل ارائه شده است. این کاربردها بر اساس مدارک و شواهد موجود در مراجع داده شده در انتهای مقاله گردآوری شده‌اند و ترتیبی در ارائه آنها رعایت نشده است.

مدلسازی، شبیه‌سازی، پایش، پیش‌بینی، تحلیل و کنترل سیستم‌های پیچیده غیر صنعتی. به نظر می‌رسد که یکی از زمینه‌های مهم کاربرد سیستم‌های کنترلی در سیستم‌های پیچیده غیر صنعتی است. مدلسازی این سیستم‌ها بسیار دشوار است و هر چند توفیقاتی در این زمینه در دهه‌های گذشته به دست آمده است، لیکن تا رسیدن به مدل‌های جامع، دقیق و کاربردی تلاشهای بیشتری نیاز است. این مطلب در باره شبیه‌سازی، پایش، پیش‌بینی و تحلیل رفتار این سیستم‌ها نیز درست است. اما در خصوص کنترل واقعی و مؤثر آنها تاکنون کار جدی و چشمگیری که اثرهای عینی و کاربردی داشته باشد، انجام نشده است. از نمونه بارز این سیستم‌ها می‌توان به سیستم‌های اقتصادی و مهندسی مالی، مدیریت بحران از قبیل زلزله یا سیل، فرماندهی نیروهای انسانی و مسائل زیست محیطی اشاره کرد. نظر به اهمیت روزافزون کاهش صدمات ناشی از عوامل طبیعی از یک سو و بالا بردن راندمان کارها و کاهش هزینه‌ها از سوی دیگر، این موضوع مورد توجه جدی پژوهشگران قرار خواهد گرفت.

پایش عملکرد. با توجه به نقش کلیدی سیستم‌های دقیق پایش عملکرد در کیفیت سیستم‌های کنترل صنعتی، پژوهش و کاربردی سازی این موضوع از اواخر قرن بیستم آغاز شده است و تاکنون نیز ادامه دارد. موضوعاتی که به نظر می‌رسد مورد توجه خواهد بود، شامل پایش عملکرد در

سیستم‌های چندحلقه‌ای و چند لایه و سیستم‌های پیچیده، با توانایی تشخیص محل خطا یا عیب است و همچنین، معیاری کلی و بدون نیاز به مدل یا توقف در کار سیستم برای فرایندهای غیرخطی است. همچنین، کاربرد ایده ترکیب اطلاعات در غنی سازی روند پایش عملکرد از مباحث مهم خواهد بود.

کنترل سیستم‌های تصمیم‌گیری پیچیده. این موضوع شامل تصمیم‌گیری فراتر از مرزهای سیستم در لایه‌های بالاتر است که کاربردهای نظامی، خدمت‌رسانی عمومی با اتوماسیون کامل رباتها و مدیریت بحران از جمله آن خواهند بود.

هوافضا و حمل و نقل. بدون شک، هوافضا و حمل نقل همانند گذشته در دهه‌های آینده نیز نقش انکارناپذیری در توسعه و کیفیت زندگی آینده خواهند داشت و سیستم‌های کنترل، فناوری کلیدی در کاربری ایمن و با عملکرد بالا در این سیستم‌ها خواهند بود. در این میان، می‌توان به خودروهایی فوق ایمن با ویژگیهای عملکردی بسیار بالا شامل سیستم‌های کنترل تزریق سوخت، حداقل‌سازی آلاینده‌سازها، کنترل کروز، سیستم‌های ترمز و قفل ضد چرخش و آسایش مسافران اشاره کرد یا در هواپیماهای عملکرد بالا و فوق ایمن، سیستم کنترل پرواز مهم‌ترین بخش سیستم است که برای ایمنی بالا احتمال خطا، عیب یا عملکرد نادرست یکی از توابع بحرانی پرواز باید کمتر از ۱۰ به توان ۹- در هر پرواز باشد. وضعیت کنونی استفاده از سخت افزارهای افزونه است. در سیستم‌های آینده، استفاده از زیرسیستم‌های هوشمند، کنترل‌های بهتر به‌منظور دستیابی به عملکردهای مورد نظر است. مثال دیگر، ساختارهای بزرگ فضایی است. این ساختارها از چندین قسمت از قبیل بخشهای انعطاف پذیر و صلب تشکیل شده است. مشکل اصلی پایدارسازی سیستم بدون تغییر شکل<sup>۴</sup> زیاد در سیستم است.

اطلاعات و شبکه‌ها. مسئله کنترل در اطلاعات و شبکه‌ها در دهه‌های آینده با پیچیدگیهای کم‌نظیری پیش‌روی مهندسان کنترل خواهد بود. رشد سریع شبکه‌های ارتباطی و اهمیت آنها در زندگی مدرن، چالش‌های جدی در زمینه کنترل آنها خواهد داشت. دو مسئله اصلی عبارت‌اند از: کنترل شبکه‌ها و کنترل روی شبکه‌ها. در باره کنترل شبکه‌ها می‌توان به مباحثی از قبیل کنترل

- 
1. Decision Making
  2. Flight Control Systems
  3. Rigid
  - 4 Deformation
  5. Control of Networks
  6. Control Over Networks

ازدحام، مسیریابی، مدیریت توان و ... اشاره کرد. مشخصه اصلی از دیدگاه دشواری کنترل عبارت است از: مقیاس بسیار بزرگ سیستم، ماهیت نامتمرکز مسئله کنترل که در آن تصمیم‌گیری باید به‌طور محلی با سرعت و بر اساس اطلاعات محلی صورت گیرد، تأخیرهای متغیر با زمان، نامعینی و تغییر در شبکه به همراه ملزومات مختلف برای تضمین کیفیت سرویس.

از سوی دیگر، کنترل روی شبکه‌ها به معنای بستن حلقه فیدبک از طریق شبکه است که کاربردهای فراوانی در خودروها و خانه‌های هوشمند، سیستم‌های هوشمند حمل و نقل شامل بزرگراهها و سایر خدمات، مهندسی پزشکی، آموزش و صدها کاربرد دیگر خواهد داشت. در واقع، هرگاه که یک شبکه مخابراتی چندین (چند ده یا چند صد هزار) سیستم را با کنترل‌کننده‌هایی مرتبط می‌سازد، کنترل روی شبکه‌ها را خواهیم داشت. یک مسیر اجتناب ناپذیر در دهه‌های آینده در این خصوص همگرایی مخابرات، کامپیوتر و کنترل در خدمت رسانی و زیرساخت‌های ریز و کلان است. شایان ذکر است که فرضیات اکثریت نظریه‌های کنونی کنترل، سیستم‌های سنکرون با ارسال به‌موقع داده‌ها از حسگرها، محرکها و زیرسیستم‌ها با تأخیرهای معلوم و محدود است. نامعینی در پارامترها یا ساختار سیستم‌ها به‌خوبی در نظر گرفته می‌شوند. چالش جدی تأخیرهای مخابراتی مدل نشده و packet‌های از دست رفته حسگرها و محرکهاست.

رباتیک و ماشین‌های هوشمند. قرن گذشته از رباتهای ابتدایی برای انتقال چیزی از یک نقطه به نقطه دیگر آغاز شد و دهه‌های آینده شاهد رباتهای انسان‌نما با ویژگی خودمختاری، تداخل با انسانها و جامعه خواهد بود. محوریت سیستم‌های کنترل در این سیستم‌ها بدیهی است و دشواری سیستم‌های کنترل آن بسیار خواهد بود.

بیولوژی. در سالهای گذشته اثرهای متقابل به‌کارگیری مبانی اصول کنترل و بیولوژی به نتایج جالبی رسیده است. ادامه این روند در کنترل به معنای الهام‌گیری از فرایندهای دقیق بیولوژیکی در طراحی سیستم‌های مهندسی کنترل است. سیستم‌های ایمنی، اصول ژنتیک، هورمونها، فیدبک در سیستم‌های اعصاب و ماهیچه‌ای، قلب، توجه و هوشیاری و ... منابعی برای الهام روشهای جدید تحلیل و طراحی سیستم‌های کنترل نوظهور است.

کاربردهای پزشکی. سیستم‌های کنترل تاکنون در توسعه دستگاههای پزشکی نقش مهمی داشته‌اند و در دهه‌های آینده وابستگی پزشکی به سیستم‌های مهندسی بیشتر خواهد شد و این نقش در دهه‌های آینده برای مهندسی کنترل پر رنگ‌تر می‌شود. از جمله کاربردهای آن می‌توان به اتاقهای

- 
1. Congestion Control
  2. Routing
  3. Power Management

عمل هوشمند، کمک در تشخیص و شناسایی بیماریها و روشهای درمان، درمان از راه دور، کنترل جریان انواع داروها در طول درمان، کنترل اندامهای مصنوعی و ترمیم سیستم عصبی و نخاعی اشاره کرد.

صنایع نفت، گاز، پتروشیمی و شیمیایی. سیستم‌های پیشرفته کنترل فرایند در دهه‌های آینده در توسعه و کاربری در این صنایع نقش کلیدی دارند. در این میان، می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: روشهای پیشرفته ترکیب اطلاعات و کنترل فرایند، استفاده از مخابرات بی‌سیم در اتوماسیون برای حذف سیم‌کشی در فرایندهای بزرگ و وارد کردن ابزار دور افتاده مانند ایستگاههای پمپ در نقاط دور افتاده در کوهها در استراتژی اتوماسیون تأثیرگذار خواهد بود. کنترل برای حداقل کردن آلاینده‌های زیست محیطی و کنترل برای بهره‌برداری حداکثر از سیستم‌ها از دیگر مباحث است. کنترل در فناوریهای نو از قبیل فناوری نانو و مواد بیو بیش از پیش مورد توجه خواهد بود. روشهای کنونی ابتدایی و فرضیات به‌کارگیری آنها نسبتاً سنگین است.

تولید انرژی در صنایع برق، هسته‌ای و انرژیهای نو. انرژی از مهم‌ترین مباحث دهه‌های آینده است و مباحث کنترلی آن نیز کلیدی خواهد بود. علاوه بر مطالب پیشگفته، به این مسائل نیز می‌توان اشاره کرد روشهای پیشرفته توزیع بار، مدیریت توان در شبکه‌های توزیع شده مستقل از هم و با اندرکنش فراون، کنترل پیشرفته برای بهره‌برداری از مواهب طبیعی در تولید انرژی پاک و شبکه‌های هوشمند. بالابردن راندمان سیستم‌های موسوم به انرژی نو از طریق سیستم‌های کنترل و بحث وارد یا خارج کردن این منابع انرژی از مدار تولید و تداخل آنها مورد توجه جدی خواهد بود.

کنترل مولکولی با فناوری لیزر. یکی از کاربردهای دهه‌های آینده کنترل مولکولی با فناوری لیزر است که دستیابی به کنترل واکنشهای شیمیایی را میسر می‌سازد. معادلات حاکم بر سیستم، معادلات غیرخطی شرودینگراند و نظریه‌های کنونی کنترل برای حل مسئله ناکافی هستند.

مسئله کنترل پدیده‌های طبیعی. مهندسی کنترل تا به امروز به‌طور جدی وارد این مقوله نشده است، لیکن به نظر می‌رسد که یکی از کاربردهای جدی مهندسی کنترل در آینده مسئله کنترل پدیده‌های طبیعی از قبیل سیل، زلزله و گردبادها باشد. پدیده‌های طبیعی نتیجه واکنش چندین پدیده پیچیده طبیعی هستند که بر هم تأثیرگذارند و مقیاس رخداد را بسیار بزرگ می‌کنند. یک پرسش کلیدی امکان کنترل آنها در مرحله‌ای از رخداد است. برای نمونه، به منظور کنترل سیل که ناشی از اندرکنش پیچیده جزر و مد، موجها و توفانهاست، سیل‌بندها یک راهکار مؤثر هستند. زمان و مدت بستن سیل بندها می‌توانند با راهکارهای کنترلی تعیین شوند.

چند مسئله کنترلی دیگر. مسائل دیگری نیز می‌توان تصور کرد که در دهه‌های آینده در دستور کار مهندسان سیستم‌های کنترلی قرار گیرند. عنوان برخی از این موضوعات عبارت‌اند از: کنترل سیالات، کنترل پلاسما، هیدرولوژی، بازیافت منابع طبیعی و اتوماسیون کاملاً هوشمند با قابلیت عیب‌یابی در مراحل اولیه وقوع عیب.

### ۲.۳. گزینه‌ای از چند مسئله نظری آینده مهندسی کنترل

با توجه به کاربردهای ذکر شده در بخش قبل و مطالعه روند دهه اخیر تحقیقات در حوزه مهندسی کنترل، می‌توان آینده مسائل نظری در تحلیل و طراحی سیستم‌های کنترلی را پیش‌بینی کرد. این کار مستلزم مطالعه آینده‌پژوهی عمیق و گسترده در مهندسی کنترل است. آنچه در این بخش ارائه شده است، فقط رئوس برخی از زمینه‌های نظری است که در ارائه آنها ترتیب خاصی لحاظ نشده است.

کنترل پیش‌بین. بیش از ۹۰٪ از سیستم‌های کنترل چندمتغیره صنعتی از نوع کنترل پیش‌بین هستند و ادامه این روند کاربرد بسیار محتمل است. مهم‌ترین عناوین پژوهشی در این زمینه می‌توانند به صورت زیر باشند:

- MPC‌های<sup>۱</sup> غیرخطی، مقاوم با توانمندبهبایی از قبیل تطابق و اثبات دقیق پایداری و همگرایی؛
- حل مشکلات بهینه‌سازی در کنترل پیش‌بین؛

کنترل هوشمند. کاربرد اصلی سیستم‌های هوشمند در دهه‌های آینده کنترل سیستم‌های پیچیده‌ای است که نتوان آنها را با معادلات متداول توصیف ریاضی سیستم مدلسازی کرد و کاربرد دیگر آنها در سطح تصمیم‌سازی است، به‌ویژه در سیستم‌های سلسله مراتبی که از یک دسته سیستم‌های مبتنی بر زمان پیوسته حالت سطح پایین و سیستم‌های مبتنی بر رویداد گسسته حالت سطح بالا تشکیل شده‌اند. مسئله اصلی نظری در این سیستم‌ها حد فاصل بین دو سطح، وجود و یکتایی پاسخها، پیچیدگی و بُعد زیاد حل مسئله به همراه بهینه‌سازی است.

- 
1. Model Predictive Controllers
  2. Hierarchical
  3. Time Driven
  4. Event Driven
  5. Interface

کنترل مقاوم و تطبیقی. این دسته از کنترل کننده‌ها نیز با وجود توسعه‌های فراوان و عمیق نظری، کماکان در میان موضوعات پژوهشی دهه آینده خواهند بود. به نظر می‌رسد که از عناوین مورد پژوهش بتوان به موارد زیر اشاره کرد:

- کنترل تطبیقی مقاوم با در نظر گرفتن انواع نامعینی‌ها و عوامل غیرخطی با در نظر گرفتن همزمان پایداری مقاوم و عملکرد مقاوم و یک رویکرد جدی کنترل مدل چندگانه و کنترل کلیدزنی است.
- ترکیب روشهای ساختار ثابت مقاوم و تطبیقی برای کاهش هر چه بیشتر محافظه کاری و افزایش کارایی و عملکرد؛
- به‌کارگیری ایده‌های کنترل مقاوم در ساختارهای نامتمرکز با تأکید بر ابعاد وسیع، پایداری و عملکرد و حفظ سادگی سیستم کنترل.

سیستم‌های کنترل هابیرید. توسعه ابزارهای کارآمدتر مدلسازی، شبیه‌سازی و تحلیل سیستم‌های هابیرید در کنار طراحی سیستم‌های کنترل برای آنها و مباحث مربوط به بهینه‌سازی در این سیستم‌ها از موضوعات پژوهشی در این زمینه است. همچنین، کنترل نامتمرکز سیستم‌های هابیرید با ابعاد وسیع مورد توجه خواهد بود.

پایش عملکرد، عیب، اغتشاش و راه‌اندازی. پیش‌یابی عیب و پایش عملکرد سیستم‌های پیچیده با داده‌های ورودی - خروجی به همراه ساختار پذیری مجدد از موضوعات مهم آینده است. توسعه ابزار نظری روشهای مؤثر و هنگام برخورد با اغتشاش در سیستم‌های پیچیده و چندین حلقه‌ای و همچنین، شناسایی منشأ اغتشاش در سیستم‌های چند حلقه‌ای پیچیده از موضوعات مهم نظری خواهد بود. از طرف دیگر، روشهای خودکار راه‌اندازی و خاموش کردن دستگاههای پیچیده صنعتی و انتقالهای بدون پرش در مراحل مختلف کاری و اغتشاشات می‌تواند از زمینه‌های پژوهشی باشد.

سیستم‌های چند عامل هوشمند. توجه به سیستم‌های چندعامل بیشتر شده است و مباحثی از قبیل مدلسازی و کنترل آنها با اثبات پایداری و همگرایی در مواجهه با نقصان اطلاعات و طراحی رؤیتگرها از زمینه‌های کاری خواهد بود.

سیستم‌های غیرخطی. در زمینه سیستم‌های غیرخطی می‌توان به این موارد اشاره کرد: کنترل بهینه غیرخطی، تخمین ترکیبی حالت و پارامترها در سیستم‌های غیرخطی، توسعه روشهای تحلیل و طراحی مقاوم سیستم‌های کنترل غیرخطی، مسئله حوزه جذب، سیستم‌های آشوبناک و آشوبناک کوپل شده از نظر کنترل و سنکرون سازی.

چند عنوان دیگر از موضوعات نظری به قرار زیر است:

- حل عددی معادلات دیفرانسیل جزئی هامیلتون - جاکوبی - بلمن ؛
- کنترل و تخمین در سیستم‌های پیچیده و توزیع شده ؛
- ترکیب روش‌های بهینه‌سازی تصادفی و کلاسیک؛
- کنترل سیستم‌های تصادفی به‌عنوان اجزایی از یک سیستم پیچیده؛
- کنترل سیستم‌های مقیاس بزرگ پیچیده با ویژگی تداخل غیرخطی در زیر سیستم‌ها و زیرسیستم‌هایی که خود پیچیدگی دارند، برای نمونه شبکه‌های پیچیده<sup>۳</sup>؛
- سیستم سیستم‌ها<sup>۴</sup>؛
- گسترش کاربرد و نظریه حسابان کسری در کنترل و ورود حسابان کسری تصادفی به حوزه کنترل.

#### ۴. سخن آخر

مطالعه و پژوهش در زمینه تحلیل و طراحی سیستم‌های کنترل در دهه‌های آینده همانند دهه‌های گذشته در توسعه پایدار و حضور در فضای بسیار شدید رقابتی آینده کلیدی است. هم‌اکنون در بسیاری از صنایع پیشرفته، سیستم‌های کنترل از اطلاعات محرمانه و طبقه‌بندی شده محسوب می‌شوند. در واقع، فناوریهای مرتبط با سیستم‌های کنترلی از سودآورترین بخشهای بسیاری از شرکتهاست. این روند در دهه‌های آینده نیز با پیچیده‌تر شدن سیستم‌ها و ظهور سیستم‌های جدید تشدید خواهد شد. از این‌رو، برنامه‌ریزی امروز در تولید علم و فناوری در مهندسی کنترل می‌تواند به حل بسیاری از مشکلات فردای صنعت کمک کند. از طرف دیگر، آشنایی با گذشته مهندسی و روندهای تولید علم می‌تواند به توسعه آینده و اعتماد به نفس علمی کمک کند و آینده‌نگاری سیر تحول مهندسی کنترل و سیستم برای انتخاب موضوع و بهره‌وری حداکثر از امکانات ضروری است. پژوهشهای آینده حتی بسیار تخصصی‌تر از فعالیتهای کنونی خواهد بود. لذا، موفقیت در پژوهش نیازمند تعامل همه‌جانبه با سایر پژوهشگران است. تعامل همه‌جانبه با سایر پژوهشگران در فضای کنونی علم و دانش مستلزم پژوهش عمیق و دقیق، مشارکت در تولید علم، استفاده از همه منابع و مراجع علمی، رعایت اصول اخلاق حرفه‌ای، احترام متقابل و ایجاد شرایط بُرد - بُرد است.

- 
1. H-J-B
  2. Distributed
  3. Complex Networks
  4. System of Systems

## مراجع

۱. خاکی صدیق، علی (۱۳۸۵)، *تاریخ مهندسی کنترل*، انتشارات دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی.
۲. خاکی صدیق، علی (۱۳۹۱)، بررسی و امکان‌سنجی کاربرد سیستم‌های کنترل فرایند پیشرفته (Advanced Process Control-APC) در پالایشگاه‌های نفت، گزارش نهایی پروژه.
3. Richard M. Murray (2003), Future directions in control in an information-rich world, Karl J. Åström, Stephen P. Boyd, Roger W. Brockett, and Gunter Stein, (2003). *IEEE Control Systems Magazine*, pp. 22-33.
4. Future research directions in systems and control (2001), A presentation by M. Athens, Visiting Research Professor, Instituto de Sistemas e Robótica, Instituto Superior Técnico, Lisbon, Portugal, June
5. Sirkka-Liisa Järmsä-Jouela, Future trends in process automation (2007), *Annual Reviews in Control*, Vol. 31, pp. 211–220.